

ハイドロホン校正を目的とした高強度超音波音源の 2次元音場シミュレーションによる音場設計

Acoustic Field Design by 2D Acoustic Field Simulation for High-intensity
Ultrasound Source System for Calibration of hydrophone

五十嵐 茂^{1) 2)}、森下 武志¹⁾、竹内 真一¹⁾

¹⁾ 桐蔭横浜大学大学院工学研究科医用工学専攻

²⁾ 職業能力開発総合大学校電子回路ユニット

(2016年3月28日 受理)

1. はじめに

近年、医療分野では、がんの治療を目的とした高密度焦点式超音波 (HIFU)^[1, 2] や遺伝子を細胞内に導入するためのソノポレーション^[3, 4]、音響化学療法による超音波治療^[5]、組織や臓器の硬さを画像化する超音波エラストグラフィ^[6]、高調波を利用するハーモニクイメージング診断法^[7] など、また、産業分野では超音波洗浄機^[8, 9]、超音波分散器^[10, 11] などの高強度超音波の使用が増えている。これら高強度な超音波音場では線形理論が成り立たない非線形の領域となり、その非線形音場の校正や評価の要求が増えると予想される。そのため、強力な超音波音場の音圧分布を受波できる堅牢なハイドロホンの開発^[12] とともに、強力な超音波を送波できる高強度音源の開発を行う必要がある。

産業技術総合研究所計量標準総合センターでは、2002年前後から超音波計量標準の整備を開始し、超音波パワーの標準は、天秤法

による超音波パワーの計測で15 Wまで、さらにカロリメトリ法による計測で100 Wまでが整備されている^[13]。また、ハイドロホンの受波感度校正に対する超音波音圧標準は、0.1 MHz～40 MHzが整備されている^[14]。これらハイドロホンの感度校正は、**図1**に示すように、送波音源の遠距離音場にPET薄膜を置きレーザー干渉計によって超音波音圧の絶対測定を行っている^[15]。高強度な超音波音場を測定可能なハイドロホンを校正するには、このPET薄膜を振動させる高音圧かつ平面波に近い超音波音場が必要となる^[16]。

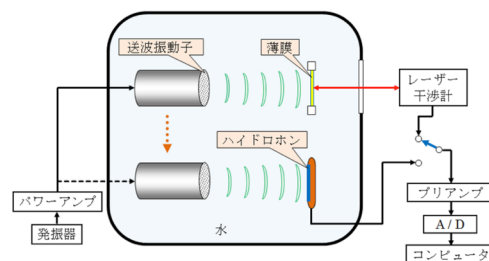


図1 メンブレンハイドロホンの絶対校正システムの構成と原理

IGARASHI Shigeru^{1), 2)}, MORISHITA Takeshi¹⁾, TAKEUCHI Shinichi¹⁾

¹⁾ Department of Biomedical Engineering, Graduate school of Engineering, Toin University of Yokohama, 1614 Kurogane-cho, Aoba-ku, Yokohama, Kanagawa, 225-8502 Japan

²⁾ Electronic Circuit Engineering Unit, Polytechnic University, 2-32-1 Ogawa-nishimachi, Kodaira-city, Tokyo, 187-0035 Japan

そこで高強度音源の開発の第1段階として、振動子の高耐圧化や印加電圧の高電圧化だけでなく、音響的に高強度化ができないかと考え、音響導波路を用いた超音波音源システムを検討している。これまで、複数の音響導波路と送波振動子を用いた超音波音源を提案^[17, 18]していたが、さらにシンプルな構造として、凹面型振動子からの集束超音波と音響導波路を組み合わせた音源を提案する。

本稿では、2次元音場シミュレーションによって、シンプルな音響導波路のモデルから出力される音圧分布を調査し、平板振動子が形成する音圧分布に類似するように音響導波路の形状を決定していく設計手順を示し、最終的に凹面型振動子を想定した集束超音波と音響導波路によって構成される超音波音源システムを提案し、この音源によって形成する音場と平板振動子の音場とを比較することによって高強度化の可能性について述べる。

2. 音響導波路の基本特性

2.1 本音源システムの動作原理

本研究で提案する音響導波路を用いた音源システムの構成を図2に示す。これは凹面型振動子からの集束超音波を、円錐状の音響導波路で囲い円筒状の音響導波路に入力し、その中を伝搬させて送波開口面から出力し超音波音場を形成する。すなわち、円筒状の音響導波路に集束超音波を入力し、送波開口面から高音圧な超音波を出力するものである。

2.2 2次元音場シミュレーションの概要

2次元シミュレーションはCyberlogic社製のWave2000を使用した。これはFDTD(時間領域有限差分法)による2次元シミュレータであり、変位分布は正負の変位を絶対値にして輝度表示される。シミュレーションの基本条件は、送波超音波は周波数1 MHz、振幅 ± 1 [a.u.]の縦波連続波とし、音響媒質は水(温度25℃、音速1497 m/s、固有音響インピーダンス1.497 MRayl)とした。音響

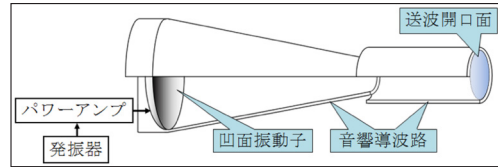


図2 音響導波路と集束超音波を用いた音源システムの概要

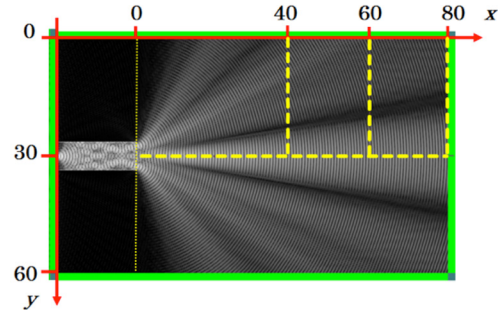


図3 2次元音場シミュレーションの領域サイズと音圧分布の算出ライン(破線)

導波路は厚さ0.2 mmの空気層(温度20℃、音速344.0 m/s、固有音響インピーダンス0.427 kRayl)に設定し、任意の空間位置における音圧値を得るために、幅0.3 mmの受波振動子を配置して音圧の時間波形を取得し、それらの音圧波形からピーク-ピーク値を求めて相対音圧値[a.u.]とした。図3に2次元シミュレーションの座標系を示す。x軸は距離方向の座標を示し送波開口面を $x = 0$ mmとする。y軸は方位方向の座標を示し、 $y = 30$ mmを中心軸とする。例えば、図中の破線のように、中心軸音圧は、 $y = 30$ mm上の $x = 0 \sim 80$ mm間に受波振動子を配置して得られるピーク-ピーク音圧値を、方位方向音圧は、 $x = 40, 60, 80$ mmの軸上の $y = 0 \sim 30$ mm間(中心から上半分の領域)に受波振動子を配置して得られるピーク-ピーク音圧値を求めて示すことにする。

2.3 送波振動子を入力とした音圧出力

まず、集束超音波の入力の代わりに、図4に示すような幅1 mmの送波振動子を円筒状の音響導波路の入口におき、その音響導波路の形状に対する音圧出力を求めた。音響導波路の長さを $L = 10, 20, 30$ mm、内幅を d

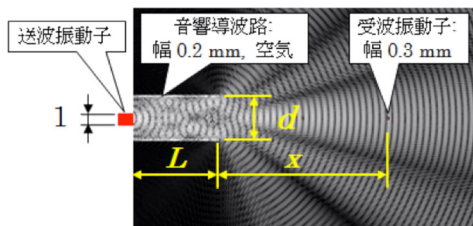


図4 音響導波路（長さ L 、幅 d ）を用いた時の幅 1 mm の送波振動子による音場シミュレーションモデル

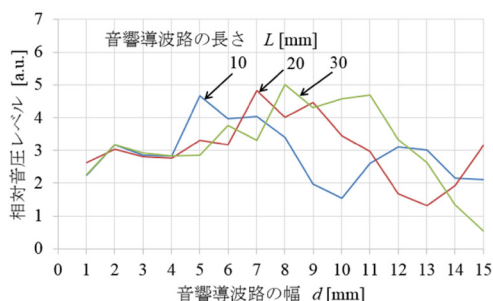


図5 音響導波路の形状（長さ L 、幅 d ）に対する中心軸距離 60 mm における音圧レベル

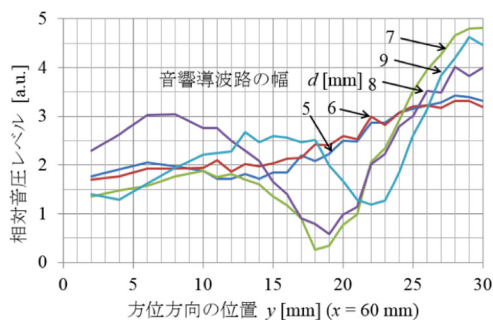


図6 送波振動子の幅 1 mm、音響導波路の長さ 20 mm に対する音響導波路の幅 d と中心軸距離 60 mm における方位方向の音圧分布の関係

= 1 ~ 15 mm とし、送波開口面からの中心軸上の距離 $x = 60$ mm の地点の音圧は図5のようになった。今回、音響導波路の長さ $L = 20$ mm に着目して、内幅 $d = 5 \sim 9$ mm とした時、距離 $x = 60$ mm 地点の方位方向の音圧分布は図6のようになった。音響導波路の長さ $L = 20$ mm、内幅 $d = 7$ mm の時に中心軸音圧が最も大きくなったので、以降、音響導波路はこの形状で検討を続ける。

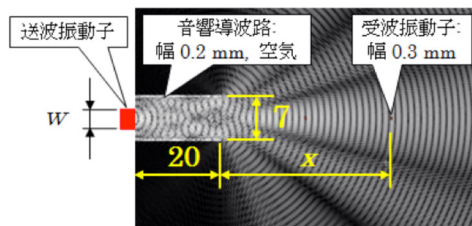


図7 音響導波路（長さ 20 mm、幅 7 mm）を用いた時の送波振動子（幅 w ）による音場シミュレーションモデル

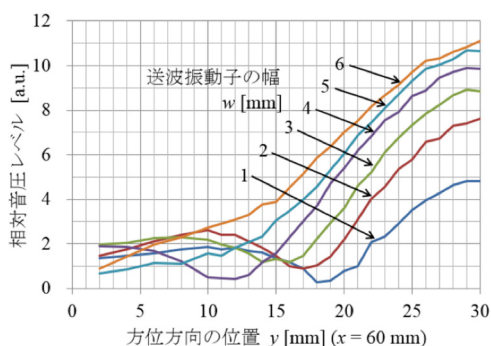


図8 音響導波路（長さ 20 mm、幅 7 mm）を用いた時の送波振動子の幅 w と中心軸距離 60 mm における方位方向の音圧分布の関係

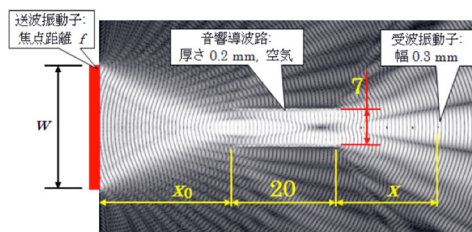


図9 音響導波路（長さ 20 mm、幅 7 mm）と送波振動子（幅 w ）からの集束超音波（焦点距離 $f = w$ 、距離 $x_0 = w$ ）の音場シミュレーションモデル

2.4 送波振動子幅と音圧出力の関係

次に、長さ $L = 20$ mm、内幅 $d = 7$ mm の音響導波路に対して、図7のように送波振動子幅 $w = 1 \sim 6$ mm とした時の音圧出力を求めたところ図8のようになった。これによると振動子幅が広くなるにつれ中心軸のピーク音圧はあがり、徐々に球面波状にビームが広がるが、内幅 3 mm 前後の時には平板振動子の方位方向音圧分布のようなメインビームとサイドローブが現れることが示さ

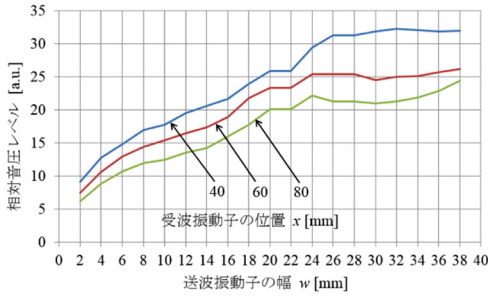


図 10 音響導波路 (長さ 20 mm、幅 7 mm) と集束超音波 (焦点距離 $f = w$ 、距離 $x_0 = w$) による中心軸距離 40、60、80 mm における送波振動子の幅 w と音圧レベルの関係

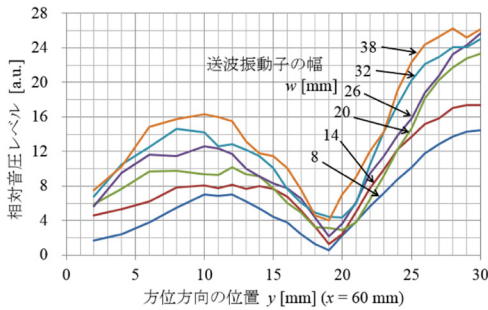


図 11 音響導波路 (長さ 20 mm、幅 7 mm) と集束超音波 (焦点距離 $f = w$ 、距離 $x_0 = w$) による中心軸距離 60 mm における方位方向の音圧分布

れた。

2.5 集束超音波を入力とした音圧出力

次に、音響導波路の入口から、内幅 3 mm の送波振動子の代わりに図 9 のモデルに示すような集束超音波を入力する。シミュレーションでは、凹面型振動子の代わり焦点距離の自動設定機能を利用し集束超音波を形成した。ここで焦点距離 f と音響導波路までの距離 x_0 はすべて送波振動子幅 w と等しく設定した。図 10 に送波振動子幅を $w = 2 \sim 38$ mm とした時の中心軸上 $x = 40, 60, 80$ mm 地点の音圧変化を示し、図 11 に、中心軸距離 60 mm における振動子幅 $w = 8, 14, 20, 26, 32, 38$ mm の方位方向の音圧分布を示す。どちらも振動子幅が大きくなるにつれ、音圧値が増加するもののビームが乱れて中心のピーク音圧が上がらない様子がみられ

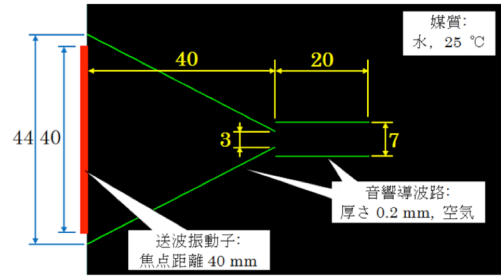
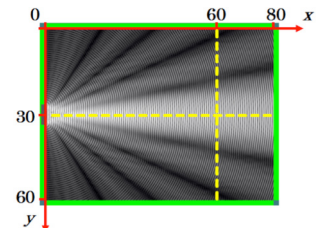
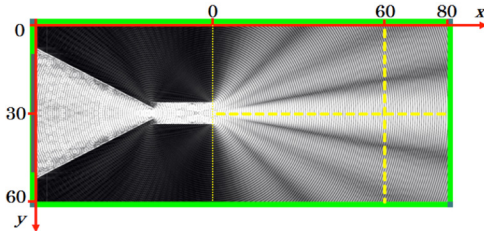


図 12 音響導波路と集束超音波を用いた音源システムのシミュレーションモデル



(a) 幅 7 mm の平板振動子



(b) 音響導波路と集束超音波を用いた音源システム (送波開口幅 7 mm)

図 13 音場シミュレーションによる変位分布 (絶対値) の比較

る。これは集束超音波が音響導波路の外側に漏れて送波開口からのビームに影響を与えているものと考えられる。

3. 音響導波路と集束超音波を用いた超音波音源システム

3.1 2次元音場シミュレーションモデル

前項の手順により、超音波の漏れの影響を防止するために円錐状の音響導波路で囲い、最終的に図 12 のような音響導波路と集束超音波を用いた超音波音源システムの 2 次元シミュレーションモデルとした。なお、凹面型振動子の代わり焦点距離 f の自動設定を利用

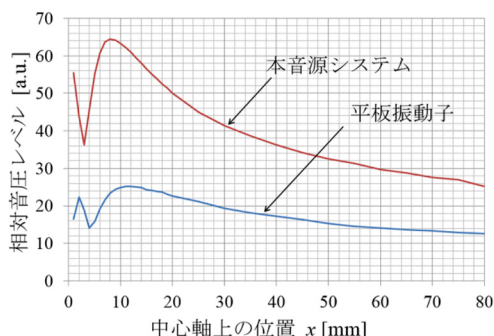


図 14 本音源システムと平板振動子の中心軸音圧分布の比較

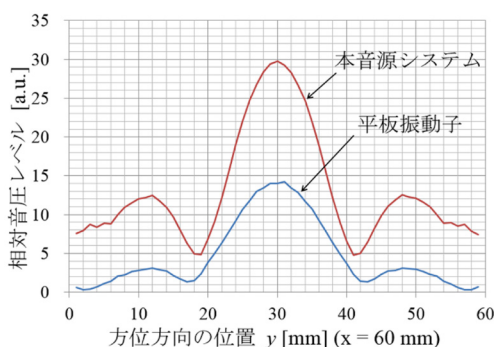


図 15 中心軸距離 60 mm における本音源システムと平板振動子の方位方向音圧分布の比較

し集束超音波を形成した。

3.2 2次元音場シミュレーション結果

幅 7 mm の平板振動子による 2 次元変位分布を図 13 (a) に、振動子幅 $w = 40$ mm、焦点距離 $f = 40$ mm、送波開口幅 7 mm とした本音源システムの 2 次元変位分布を同図 (b) に示す。これらによると後者の送波開口面以降の変位分布が前者の変位分布に似た分布が形成されている。そこで、両者の中心軸上の音圧分布を求め、送波面が一致するよう重ねて表示すると図 14 となる。さらに、両者の送波開口面から 60 mm の地点における方位方向の音圧分布を重ねて表示すると図 15 となる。これらの結果を整理して、メインビームのピーク音圧、-6dB ビーム幅、サイドローブのピーク音圧お

よびサイドローブとメインビームのピーク音圧比をまとめると表 1 のようになる。メインビームの音圧ピーク値は、単一振動子よりほぼ同じビーム幅で 2.12 倍となった。しかし、メインビームに対するサイドローブのレベル比は 1.91 倍となった。サイドローブの増加については、ハイドロホン校正のための薄膜はメインビームによって振動させるので、このサイドローブが薄膜に影響を与えないように考慮して対処する必要がある。

3.3 シミュレーションモデル構築の手順

これまでの 2 次元シミュレーションをまとめると以下のようになり、これは平板振動子に類似した音場を設計するための一つの手順になるものと考えられる。

- ① 音響導波路の入口に幅 1 mm の送波振動子を置き、出力される音圧値により音響導波路の形状を決定する。今回は音響導波路の長さ $L = 20$ mm に設定し、その上で音響導波路の幅 $d = 7$ mm が決定された。
- ② 送波振動子幅 w を変化させて、出力される方位方向の音圧分布によりビーム形状を調査する。今回は送波振動子幅が 3 mm 前後の時に平板振動子に類似した音場ビームが得られた。
- ③ 凹面型振動子の代わりに幅 w の送波振動子に、焦点距離 f を自動設定した集束超音波を音響導波路に入力し、出力の方位方向の音圧分布によりピーク音圧の増加特性を調査する。今回は送波振動子の幅が大きくなるにつれピーク音圧は増加するが、集

表 1 中心軸距離 60 mm における方位方向の音圧分布の評価

メインビーム ピーク音圧 P [a.u.]	メインビーム -6 dB 幅 BW [mm]	サイドローブ ピーク音圧 P' [a.u.]	サイドローブと メインビームの ピーク音圧比 R
$P_w = 29.74$	$BW_w = 14.5$	$P'_w = 12.53$	$R_w = P'_w / P_w = 0.42$
$P_s = 14.03$	$BW_s = 15.0$	$P'_s = 3.10$	$R_s = P'_s / P_s = 0.22$
$P_w / P_s = 2.12$	$BW_w / BW_s = 0.97$	—	$R_w / R_s = 1.91$

Suffix W: 音響導波路を用いた音源, S: 平板振動子

束超音波が音響導波路の外側に漏れ送波開口からのビームに影響を与えていることが考えられる。

- ④ 最終的に、送波振動子幅 $w = 40$ mm、焦点距離 $f = 40$ mm とした集束超音波を、円錐状の音響導波路で囲いながら円筒状の音響導波路に入力し、送波開口面から出力して超音波音場を形成する。

4. まとめ

音響導波路と凹面型振動子を想定した集束超音波を用いた超音波音源システムを提案し、2次元音場シミュレーションにより、幅7 mmの単一振動子と同等のビーム幅を形成しピーク音圧は約2.1倍となった。

この結果により高強度化の可能性が示めされたと同時に、音響導波路用いた超音波音場の設計手順も示された。

【参考文献】

- [1] 安田 惇, 吉澤 晋, 梅村 晋一郎, “Triggered HIFU を用いたローズベンガル水溶液中のキャビテーション気泡の高速度撮影”, Jpn J Med Ultrasonics Vol.42, Suppl. S478, 2015
- [2] 佐々木 博史, 中村 高太郎, 吉澤 晋, 梅村 晋一郎, “強力集束超音波治療における多点キャビテーション気泡を利用した加熱凝固領域の増大”, Jpn J Med Ultrasonics Vol.40, Suppl. S439, 2013
- [3] 入江 豊, 立花 克郎, フェリル ロリト, 遠藤 日富美, 山口 和記, 原田 慶美, “Sonoporation 法による皮膚への遺伝子導入”, Jpn J Med Ultrasonics Vol.35, Suppl. S557, 2008
- [4] 小玉 哲也, 青井 あつ子, 渡邊 夕紀子, 堀江 佐知子, 富田 典子, 小野 栄夫, 森 士朗, “ソノポレーションによる遺伝子導入効率: 気泡特性に対する検討”, Jpn J Med Ultrasonics Vol.34, Suppl. S295, 2007
- [5] 弓田 長彦, 西垣 隆一郎, 梅村 甲子郎, 梅村 晋一郎, “音響化学療法の研究—超音波による薬物の抗腫瘍活性化—”, Jpn J Med Ultrasonics, Vol.18, No.6, pp.537-545, 1991
- [6] 三竹 毅, “エラストグラフィーなど超音波先端技術の最新状況”, Jpn J Med Ultrasonics Vol.33, Suppl. S171, 2006
- [7] 網野 和宏, 小菅 正之, 大西 隆之, 田中 一史, 宮本 和夫, 曹 景文, “コンパウンド・インパルス送信波形を用いた Broadband Harmonics について”, Jpn J Med Ultrasonics Vol.37, Suppl. S334, 2010
- [8] 超音波洗浄機, <http://www.kaijo.co.jp/sansen/index.html>, 株式会社カイジョー
- [9] 超音波洗浄機, http://www.honda-el.co.jp/industry/list020_7.html, 本多電子株式会社
- [10] 超音波分散機, <http://www.sonic-tech.co.jp/CL04/2-index.html>, 株式会社ソニックテクノロジー
- [11] 超音波分散機, <http://www.smt-gr.co.jp/dispersion/forte.html>, 株式会社エスエムテー
- [12] 椎葉 倫久, 植村 友樹, 岡田 長也, 内田 武吉, 菊池 恒男, 黒澤 実, 竹内 真一, “チタン製前面板を有する堅牢型ハイドロホンの特性改善に関する検討”, 信学技法 112(387), pp.87-92, 2013.
- [13] 超音波パワー標準, https://unit.aist.go.jp/rima/acs-ultsn/calibration/calibration_ultrasound.html#01, 産業技術総合研究所計量標準総合センター
- [14] 超音波音圧標準, https://unit.aist.go.jp/rima/acs-ultsn/calibration/calibration_ultrasound.html#02, 産業技術総合研究所計量標準総合センター
- [15] 菊池 恒男, “我国における超音波計量標準の整備状況と今後の課題”, Jpn J Med Ultrasonics, Vol.36, No.6, 2009
- [16] IEC 62127-2, “Ultrasonics — Hydrophones — Part 2: Calibration for ultrason-

ic fields up to 40 MHz”, 2007

- [17] 五十嵐茂, 竹内真一, “複数の音響導波路を用いて形成する超音波音場”, 日本音響学会講演論文集, pp.1383-1384, Sep., 2014
- [18] S. Igarashi and S. Takeuchi, “Control of Ultrasonic Acoustic Fields by Multiple Acoustic Waveguides and Piezoelectric Transducers”, SENSORDEVICES, IARIA, pp.26-31, Nov. 2014